第 37 卷 第 1 期 原 子 核 物 理 评 论 Vol. 37, No. 1
2024 年 2 月 Nuclear Physics Review Feb., 2024

文章编号： 1007-4627(2024) 01-0040-10

用于不稳定核研究的精密激光核谱学的发展与机遇

刘寅绅[1]，杨晓菲[1]，张 鹏[1]，胡晗睿[1]，白世伟[1]，王姝婧[1]，刘永超[1]，郭洋帆[1]，林喆阳[1]，严 周[1]，梅文聪[1]，陈少杰[1]，倪欣悦[1]，谢秉奇[1]，叶沿林[1]，李奇特[1]，李弘伟[2]，贺创业[2]，杨 杰[3]，刘作业[4]

(1. 北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室，北京 100871；
2. 中国原子能科学研究院，北京 102413；
3. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
4. 兰州大学核科学与技术学院，兰州 730000)

摘要：不稳定原子核的基本性质是开展奇特核结构研究的重要依据。基于多学科交叉的精密激光核谱技术可以通过测量原子、离子或分子的超精细结构谱提取原子核自旋、磁矩、电四极矩、电荷半径等基本性质，目前在核素版图各质量区域的不稳定核奇特结构研究中均发挥着重要作用。本文从超精细结构谱的研究历史出发，阐述了精密激光核谱技术的基本原理和测量方法。在此基础上，本文以 Pb ($Z = 82$) 核区丰质子侧不稳定核的结构研究为例简述激光核谱学方法在核结构研究中的独特优势。此外，本文介绍了近年来国内共线激光谱和共线共振电离谱技术的发展现状与最新进展。最后展望了激光核谱技术在未来国内的核物理大科学装置上的应用规划，在不稳定核性质和结构，以及基于放射性分子谱的基本对称性研究方面的广阔前景。

关键词：超精细结构，激光谱技术，不稳定原子核，荧光探测，离子探测

中图分类号：O571.53 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.37.01.40

1 引言

原子核是涉及强、弱、电磁三种基本相互作用的量子复杂多体系统。随着放射性核束装置与同位素分离技术的发展，核素版图中更加远离 β 稳定线的不稳定原子核成为可以探索的目标。实验逐步发现这些不稳定原子核展现出了不同于稳定核的新奇特性和结构，不断挑战原有核结构图像并促进核理论模型的不断创新发展。自上世纪 80 年代 I. Tanihata 等人在实验上发现晕核现象后[1]，一大批针对不稳定核的实验及理论探索工作迅速涌现，集团结构、新幻数、壳演化、形状共存等新概念被逐步提出，使得放射性核束物理成为当今核物理基础研究的前沿领域之一。

原子核的基本性质包括质量、自旋、电磁矩和半径等，这些实验观测量不仅是研究核结构的有效手段，更是探究核子间相互作用的灵敏探针，在检验和发展核理论模型中也发挥着重要作用[2-4]。在实验上已经发展了多种探测手段来测量原子核的基本性质。例如，储存环、彭宁阱和多反射飞行时间谱仪等技术可以精确测量原子核的质量[5-6]；利用电子散射、μ 原子等方法可以测量原子核的电荷半径；通过转移反应、衰变实验等方式可以获得原子核自旋[7]；利用核磁共振和核四极共振等方法可以测量原子核磁矩及电四极矩[8] 等。基于多学科交叉的精密激光核谱技术是同时测量原子核的自旋、磁矩、电四极矩、电荷半径等基本性质的有效手段，在不稳定核，特别是极端丰中 (质) 子核的基本性质测量中有着独特的优势。

激光核谱学技术通过测量原子、离子或分子的超精细结构和同位素移位来精确提取原子核的基本性质[3]。这种原子核实验探测技术于上世纪 70 年代兴起[9]，随着不稳定核研究的不断深入，已经在世界各地的放射性核束装置上广泛应用。本世纪初，结合了射频四极束流冷却聚束技术的激光核谱实验测量灵敏度显著提升[10]，已经能够实现对流强约为 10^{3-4} pps(离子数/秒) 的核素的高精度测量，现在已经成为国际上各大放射性核束装置上的标准终端配置，在核素版图各质量区的不稳定核的基本性质研究中均发挥着重要的作用[11-15]。例如，重质量的 Pb 核区丰富的形变与形状共存现象就是在早期通过激光核谱技术研究发现的，而时至今日依然是奇特核结构研究的热点[16]。除了不稳定核性质和结构等基础研究外，激光核谱技术在生物医学等交叉学科领域也有着

收稿日期：2024-02-15； **修改日期：**2024-02-15
基金项目：国家自然科学基金（编号 12027809，U1967201 和 11961141003)；国家重点研发计划（编号 2022YFA1604800, 2023YFE0101600）
作者简介：刘寅绅（1998–)，男，河南确山人，博士研究生，从事粒子物理与原子核物理研究；E-mail: liuyinshen@stu.pku.edu.cn
通信作者：E-mail: xiaofeiyang@pku.edu.cn

广泛的应用前景[3,17]。

此前，在国内的放射性核束装置上还没有通过激光核谱技术开展原子核性质和结构研究的经验。近年来，北京大学团队与国内的多家单位开展合作，已经发展了基于荧光探测的共线激光谱设备，并成功应用于北京放射性核束装置[18]（BRIF: Beijing Radioactive Ion-beam Facility），开展了国内首个针对不稳定核的激光核谱在线实验[19-20]。近期，基于离子探测的共线共振电离谱离线设备的建设和离线测试工作也取得了重要进展[21]。

本文将从超精细结构出发阐述激光核谱方法的技术原理，特别是共线激光谱技术的基本原理和优势。在此基础上，以重质量 Pb 核区丰质子核的奇特形变为例说明激光核谱学方法在不稳定核奇特结构研究中的作用和优势。本文还将介绍国内共线激光谱设备的研制情况，包括国内首个不稳定核的在线激光核谱实验以及近期共线共振电离谱仪的研制和测试进展。

2　从超精细结构到精密激光核谱

2.1　超精细结构的发现与研究历史

尽管以 Michelson、Fabry 和 Perot 为代表的物理学家在 19 世纪末就首次观察到了光谱线的超精细结构[22]，但当时还缺乏物理图像解释这种现象的成因。针对这种精细结构谱线变宽甚至劈裂的现象，曾经有观点认为，这些劈裂与同位素相关，或者应该为电子引入额外的量子数[23]；1924 年，Pauli 首次提出了核自旋的假设以解释超精细结构现象。他认为原子核本身的角动量可以与核外电子的角动量耦合出总角动量[24-25]。他还指出，针对光谱线的分析可以增进对原子核结构的理解。

1927 年，Back 和 Goudsmit 详细分析了 Bi ($Z = 83$, $A = 209$) 元素的超精细结构谱线，得出 ^{209}Bi 原子核角动量为 9/2 $\hbar$ 的结论[26]。他们在进一步研究帕邢-巴克效应后证实了 Pauli 有关核自旋的观点，并认为原子核存在磁矩。1930 年，Fermi 定量计算了磁偶极超精细相互作用在超精细结构谱中的贡献[23]；1932 年，中子的发现及质子磁矩的测量改变了人们对原子核组成和结构的认知。1935 年，Schüler 和 Schmidt 发现了实验中观测到的超精细结构分裂间距与磁偶极超精细相互作用的理论计算结果存在较大偏差[27]。基于此，Casimir 首次提出了电四极超精细相互作用在超精细结构谱中的贡献。[23,28]

如今超精细结构的理论解释已经相当清楚：原子核的电磁性质对核外电子运动存在影响，致使原子、离子和分子的能级在精细结构能级的基础上进一步变化和分裂。正是由于这种变化和分裂来源于原子核与核外电子之间的电磁相互作用，超精细结构谱的精密测量为研究原子核的基本性质提供了独一无二的新途径。

2.2　激光核谱学的基本原理

原子核与核外电子间存在电多极超精细相互作用与磁多极超精细相互作用。在满足对称性要求的前提下，磁偶极超精细相互作用和电四极超精细相互作用在超精细分裂中占主导；更高阶项电磁相互作用的贡献一般可以忽略。实验上观测到的每一个新分裂的超精细结构能级相比原有精细结构能级的偏移可以写成：

$$\Delta E = a\frac{K}{2} + b\frac{\frac{3}{4}K(K+1) - I(I+1)J(J+1)}{2(2I-1)(2J-1)IJ} \tag{1}$$

其中，核外电子总角动量量子数 $\boldsymbol{J}$ 与原子核自旋 $\boldsymbol{I}$ 耦合出量子数 $\boldsymbol{F}$，即 $K = F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)$。公式 (1) 中第一项即为磁偶极超精细相互作用的贡献，第二项为电四极超精细相互作用的贡献；a 为磁偶极超精细结构常数，满足 $a = \frac{\mu_I B_e}{IJ}$；b 为电四极超精细结构常数，满足 $b = eQ_S\left\langle\frac{\partial^2 V_e}{\partial z^2}\right\rangle$。这里的 B_e 为电子运动在原子核处产生的磁场强度，$\langle\frac{\partial^2 V_e}{\partial z^2}\rangle$ 为原子核处的电场梯度。可见超精细结构能级偏移 ΔE 与原子核的自旋 I、磁矩 μ_I、电四极矩 Q_S 直接相关。图 1中具体展示了 ^{197}Au ($I = 3/2$) 核外电子的 $6s^2S_{1/2}$ 和 $6p^2P_{3/2}$ 能级的超精细结构能级，以及相应的跃迁和超精细结构谱。

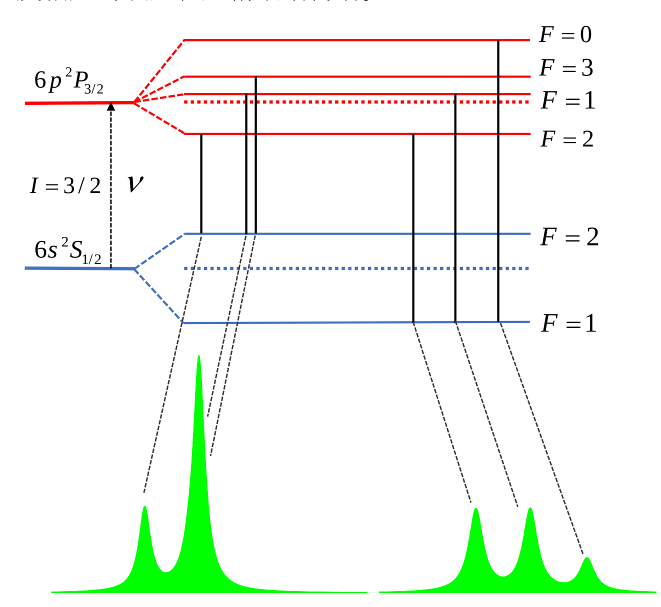


图 1　（在线彩图）自旋为 $I = 3/2$ 的 ^{197}Au 原子 $6s^2S_{1/2}$ 和 $6p^2P_{3/2}$ 能级的超精细能级分裂，以及相应跃迁的超精细结构谱

实验上测得超精细结构谱后，一般很容易通过谱线的条数、间距和相对强度等直接确定待测核自旋 I。对

测量的超精细结构谱的拟合分析可以提取出超精细结构常数 A 和 B，以及原有精细能级之间的跃迁频率 (即中心频率)ν。对于同一元素的不同同位素来说 (即 Z 相同，N 不同)，在忽略超精细结构异常的一阶近似下，核外电子在原子核位置处产生的磁场 B_e 和电场梯度 $\frac{\partial^2 V_e}{\partial z^2}$ 可近似视为常数。在使用核磁共振、核四极共振等方法精确测量出参考核（一般为稳定核或长寿命核）的磁矩 (μ_{ref}) 和电四极矩 (Q_{ref}) 的前提下，可以通过相对测量的方法提取待测核的磁矩 (μ_X) 与电四极矩 (Q_X)，即：

$$\mu_X = \mu_{ref}\frac{A_X I_X}{A_{ref} I_{ref}} \tag{2}$$

$$Q_X = Q_{ref}\frac{B_X}{B_{ref}} \tag{3}$$

同一元素的不同同位素之间，由于质量及电荷半径不同，中心频率 ν 也会发生相应的变化。两个同位素 A 和 A' 对应的超精细结构谱的中心频率之差称为同位素移位，即

$$\delta\nu^{AA'} = \nu^{A'} - \nu^{A} = K_{MS}\frac{M^{A'} - M^{A}}{M^{A'} M^{A}} + F\delta\left\langle r^2\right\rangle^{AA'} \tag{4}$$

如公式 (4) 所示，同位素移位主要由两部分贡献：第一项为质量移位，主要成因为原子核围绕核质心的移动；第二项为场移位，来源于原子核电荷分布对核外电子能级的影响，这一项与原子核的电荷半径直接相关。K_{MS} 和 F 分别为质量移位因子和场移位因子，对于同一元素的不同同位素，这两个参数可近似为常量，一般通过原子理论计算或已有电荷半径数据刻度得到。因此，在实验上测量出同位素移位 $\delta\nu^{AA'}$ 后，就可以基于公式 (4) 计算两个同位素的均方电荷半径差 $\delta\left\langle r^2\right\rangle^{AA'}$ [29]。

2.3 用于原子核基本性质测量的激光核谱学实验方法

利用精密激光核谱方法测量超精细结构谱的基本原理有两种：一种是激光诱导的荧光探测，另一种是多步激光共振电离后探测离子[3]。基于这两种不同的探测手段，目前国际上已经发展了不同类型的激光核谱技术，它们在测量灵敏度和分辨率等方面有各自的优势。

激光诱导的荧光探测技术使用一束连续窄带可调谐激光，将核外电子由基态（或亚稳态）共振激发，通过记录激发态退激过程中发射的荧光光子，得到超精细结构谱[30]。采用激光诱导荧光探测的典型实验技术为共线激光谱，这种技术自上世纪下半叶问世以来，已经在核素版图各质量区不稳定核结构与性质的研究中发挥了重要的作用。目前利用激光核谱技术研究的约 1000 个核素中逾八成是采用共线激光谱技术测量的[3]，这主要源于共线激光谱技术的高分辨率优势。共线激光谱技术采用激光束与快离子/原子束共线或反共线的方法来实现激光诱导荧光探测。在此类实验中，束流的能量离散主要取决于离子源或射频冷却聚束器的加速电压带来的能量离散 δE。此能量离散一般为几个 eV，随加速电压的升高基本保持为常数。共线激光谱实验测量采用的束流能量一般为几十 keV (如 30-60 keV)，因此在离子束被加速后，来源于能量离散 δE 而造成的多普勒展宽满足关系

$$\Gamma_D = \nu_0\frac{\delta E}{\sqrt{2Emc^2}} \tag{5}$$

其中 ν_0 为共振激发离子或原子的激光频率。可见，随着离子束的能量 E 的增大，由能量离散 δE 造成的多普勒展宽 Γ_D 被压低。图 2中定性给出了利用共线激光谱技术压低多普勒展宽的原理及效果图。由图可以看出，当束流被加速至几十 keV 后，由束流能量离散造成的多普勒展宽约为几十 MHz，这与激发态能级寿命（能量不确定性）带来的谱线自然展宽相当。轻核区原子核超精细结构劈裂较小，一般在几十到几百个 MHz 的数量级，因此只有当激光核谱实验测量的超精细结构谱的总谱线展宽（多普勒展宽和自然展宽）较小时，才能更好地区分各超精细能级跃迁的共振峰（如图 2右），从而实现对原子核自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等多个基本性质的全面测量。正是共线激光谱技术对多普勒展宽有很好的压制能力，使得其具有高分辨的优势，因此可用于各质量区不稳定核的性质测量。

本世纪初，基于射频四极冷却聚束技术的脉冲束流的产生，共线激光谱技术的探测灵敏度大幅提升，在保持高分辨率优势下能够实现对计数率低至 10^{3-4} pps 的不稳定核素的测量[31]。因此，这种技术近年来在国际范围内的放射性核束装置上相继部署，如欧洲核子研究中心 ISOLDE (Isotope Separator On-Line DEvice) 装置上的 COLLAPS (COLlinear LAser SPectroscopy)[32]、美国密歇根州立大学国家超导回旋实验室的 BECOLA (BEam COoler and LAser spectroscopy)[33]，芬兰于韦斯屈莱大学的 IGISOL (Ion Guide Isotope Separator On-Line)[34]、加拿大粒子物理与核物理国家实验室 ISAC (Isotope Separation and ACceleration) 装置上的 CFBS (Collinear Fast Beam laser Spectroscopy)[35] 等等。这些共线激光谱实验终端已经在不稳定核性质和奇特结构研究中发挥了重要作用。为了研究核素版图中更加远离 β 稳定线的核素，新型的共线激光谱实验设备也在不断发展，着眼于进一步提升装置灵敏度，如欧洲核子中心 ISOLDE 装置上正在发展中的基于多反射飞行时间谱仪的共线激光谱 MIRACLS (Multi Ion Reflection Apparatus for Collinear Laser Spectroscopy)[36] 等。

基于多步激光共振电离的实验方法，首先使用第一

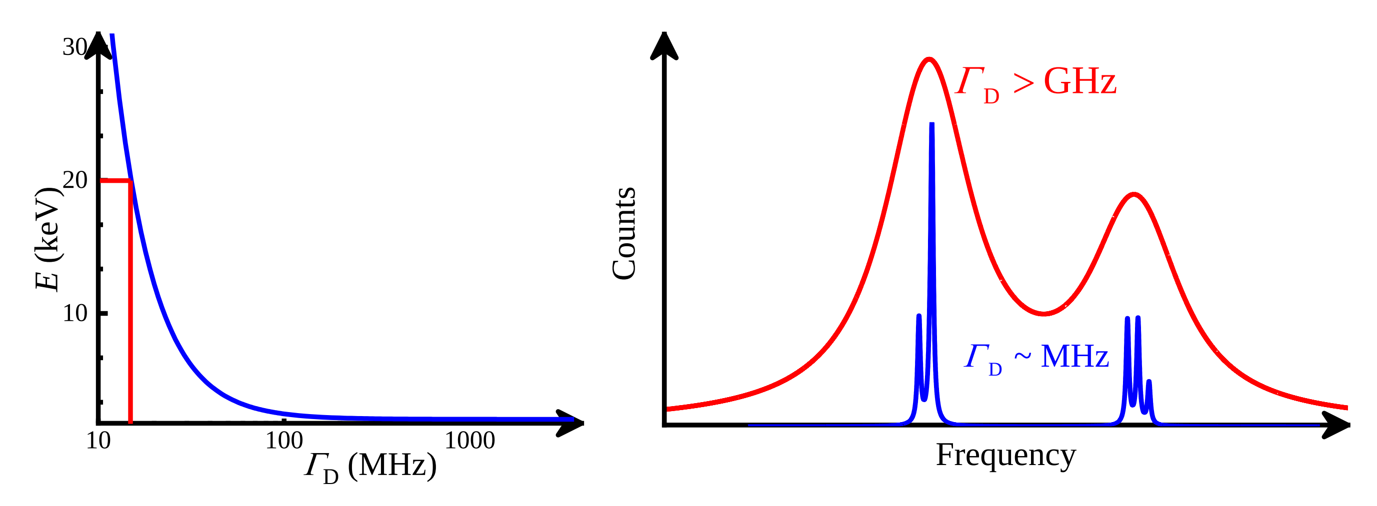


图 2　（在线彩图）利用共线激光谱技术压制多普勒展宽的原理（左）和效果图（右）

步激光使待测原子共振激发，再使用一步或多步激光使原子电离，通过探测被电离后的离子即可得到超精细结构谱。某些元素存在较为合适的自电离态，因此也可以使用多步激光共振激发原子至自电离态的方式以实现更高的电离效率。此外，也可采用多步激光将原子共振激发至里德堡态，随后由强电场电离[37]。

在源激光谱技术是采用多步激光共振电离方法的典型代表。ISOL (Isotope Separator On-Line) 型放射性核束装置的靶源中发生的反应类型及产生的反应产物种类繁多，在源激光谱在靶源中采用多步激光共振电离目标核素的原子，并收集引出后的离子，从而测量超精细结构谱。这种在源激光谱技术的灵敏度极高，在低产额放射性核素的测量中拥有显著优势，已经实现了对计数率低于 1 pps 的核素的测量，特别是在重质量的 Pb (Z = 82) 区域奇特核结构研究中发挥了重要作用[38]。但由于靶源的反应热腔（一般 >2000 K）中离子热运动较为剧烈，热运动造成的多普勒展宽使得在源激光谱测量的超精细结构谱的分辨较差（一般 > GHz），因此一般难以测量目标核的自旋和电四极矩。

近年来，基于共线激光谱的共线共振电离谱技术 CRIS (Collinear Resonance Ionization Spectroscopy) 迅速发展起来[39]。这种技术采用快离子脉冲束与多步脉冲激光共线的方式压制了多普勒展宽，同时采用共振电离探测离子的方式避免了荧光探测本底较大的问题，因此可同时实现高分辨和高灵敏度测量。目前，这种技术已经在保持高分辨 (几十 MHz) 前提下实现了对计数率低至 10^{1-2} pps 的核素的精确测量。[12,40]

3　利用激光核谱学方法开展的不稳定核研究举例

如上所述，精密激光核谱方法在不稳定核基本性质和奇特核结构研究中发挥了重要作用，在核素版图的各质量区都发现了新的奇特现象。例如，在轻核区，^{11}Li 和 ^{11}Be 是中子晕核的典型代表，使用激光核谱技术得到的电荷半径明显小于物质半径，验证了晕结构的存在[41-42]；在 N = 20 附近的反转岛区，基于激光核谱技术得到的 Na、Mg、Al 等同位素的自旋、电磁矩和电荷半径，成功探究了闯入态和形变的机制[43]；在中等质量区，针对 Cu、Zn 等同位素的激光核谱学测量成功验证了张量力驱动壳演化的理论图像[44]，并首次发现了 ^{78}Ni 附近的形状共存现象[13]。下面，我们将以 Pb (Z = 82) 核区丰质子核的奇特结构为例，说明激光核谱方法在不稳定核奇特结构研究中的贡献。

通过激光核谱学方法测量缺中子 Pb 核区不稳定原子核的电荷半径等性质发现，这一区域的原子核展现出了丰富的形变和形状共存现象，其中的标志性代表就是 Hg (Z = 80) 同位素中出现的形状交错现象。图 3中绿色点为实验测量的 Hg 同位素链的均方电荷半径差。可见，在中子数为 N = 105, 103, 101 处，原子核的电荷半径相比临近的偶偶核发生突变，意味着这些原子核发生了大的形变。而在更加丰质子的区域，这种形状突变现象消失。实验上，这种电荷半径突变的现象上世纪 70 年代就被观测到，被称为形状交错现象[45-48]。直到近几年，这种形状交错现象的形成机理才被蒙特卡罗壳模型 (Monte Carlo Shell Model，MCSM) 的计算结果成功解释。计算结果显示，Z = 82 满壳以上的质子 $\pi 1h_{9/2}$ 轨道被压低，形成闯入态。A = 181、183、185 的 Hg 核素中的质子跨壳激发填充 $\pi 1h_{9/2}$ 闯入态，且随着质子的跨壳激发，

中子也更多地占据在 $\nu 1i_{13/2}$ 轨道，导致原子核出现较大的四极形变，从而发生形状交错现象。近期激光核谱学测量结果也表明在中子数 $N = 105$ 处，附近的 ^{188}Bi 核素 ($Z = 83$) 也出现了类似的形状交错现象 (图 3中蓝色点)[49]；而临近的 Pb 同位素 ($Z = 82$) 的基态保持近球形（图 3中红色圆点）。[50]

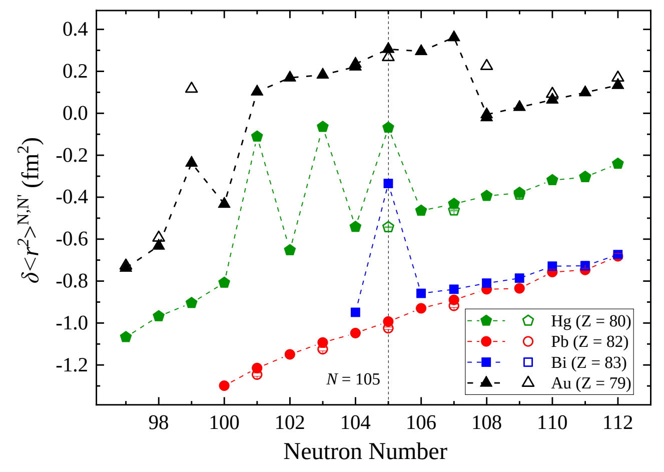


图 3　（在线彩图）Pb 区域缺中子核素的均方电荷半径，其中实心点表示基态，空心点表示同核异能态[51]。

除形状交错现象外，形状共存是这一区域出现的另一种奇特核结构现象。形状共存往往出现在质子 (或中子) 闭壳而中子 (或质子) 半满壳的情况。此时在能量上粒子-空穴对的跨壳激发增强，导致形成单粒子能较低的形变闯入态，即能量临近基态的同核异能态。例如，利用激光核谱方法测量的 ^{185}Hg ($N = 105$) 核素基态和同质异能态的电荷半径差别很大，表明此核中存在形状共存。

激光核谱实验测量的 Au ($Z = 79$) 同位素的电荷半径显示出与临近的 Hg、Bi 和 Pb 同位素完全不同的新奇特性，如图 3中黑色点[51-54]。在缺中子 Au 同位素中，自 $N = 108$ 开始，随着中子数逐步减少，Au 同位素的基态电荷半径出现突增，表现出大形变现象。这种形变在 $N = 101 - 107$ 之间保持了相同的趋势，因此这一区域也被称作 Au 同位素链中的“形变岛”。这种大形变现象在 $N = 100$ 的 ^{179}Au 核素中消失，但 $N = 99$ 的 ^{178}Au 核素的基态和同核异能态的电荷半径又突然增加，出现了明显的形状改变。

目前该核区原子核（特别是 Au 同位素）的基本性质主要是通过在源激光谱方法测量的。在源激光谱的高灵敏度优势非常适合应用于重核区产额极低的不稳定核测量，但由于其测量的谱线分辨受限，大多数核的自旋信息还没有完全确定下来，大部分核的电四极矩信息未知。因此，为了进一步研究 Au 同位素形变岛现象的形成机制，使用高分辨的共线激光谱方法测量缺中子 Au 同位素的自旋和电四极矩等信息是十分必要的。目前，基于欧洲核子中心 ISOLDE 放射性核束装置的高分辨共线共振电离谱实验终端测量缺中子 Au 核素的实验计划已获批[51]。在此实验中，我们将利用共线共振电离谱的高灵敏高分辨优势，开展缺中子 Au 同位素的自旋和电四极矩等基本性质测量。

4　国内共线激光谱技术的发展

4.1　基于荧光探测的共线激光谱在线实验

尽管激光核谱技术已经在世界范围内的放射性核束装置上广泛应用，但此前在我国的放射性核束装置上还没有用于不稳定核性质研究的激光核谱实验终端。2021 年，北京大学激光核谱与核性质课题组与中国原子能科学研究院的团队合作，在北京放射性核束装置 (BRIF) 上建设了基于荧光探测的共线激光谱实验终端，并成功开展了国内首个针对不稳定核的激光核谱在线实验[19]。

BRIF 装置的共线激光谱实验终端如图 4所示。由回旋加速器产生的能量约为 100 MeV 的质子束轰击 CaO 靶，反应产物 ^{38,39}K 经表面离子源电离并引出，加速至 60 keV 后被质量分离。^{38,39}K 离子经 80 度电偏转进入共线激光谱束流线，经束流光学系统整形、法拉第杯诊断后, 进入装有碱金属蒸汽 (K) 的电荷交换室。在电荷交换室中，^{38,39}K 离子同 K 蒸汽碰撞发生电荷交换反应，被中性化；同时，电荷交换室上游的电压扫描电极可以加载 ±2 kV 范围内的电压。由于电极与电荷交换室电势相同, 被中性化的原子将在束流线下游维持相同的动能。因此可以通过改变加载在电压扫描电极上的电势改变原子速度，进而在维持激光频率恒定的情况下，通过多普勒效应改变原子感受到的激光频率，从而实现通过扫描电压获取超精细结构的功能。未被中性化的离子被电荷交换室下游的偏转电极去除，布居在基态的 ^{38,39}K 原子进入荧光探测区，被一束窄带连续激光共振激发。处于激发态的原子退激产生的荧光光子随后由四个光电倍增管探测, 记录的信号经电子学器件送入在线数据获取系统, 通过记录共振信号与对应的扫描电压，就能得到 ^{38,39}K 的超精细结构，图 4右侧给出了在线实验测量的 ^{38}K 的超精细结构谱。在荧光探测区前后各安装了一组锥形孔阵列，主要用于减少激光散射光子进入探测区从而降低本底；荧光探测区后安装的 MagneTOF 计数器在实验过程中可用于实时监测束流情况。

通过对图 4中 ^{38}K 的超精细结构谱的拟合得出电偶极超精细结构常数及同位素移位，推算出 ^{38,39}K 的磁矩及电荷半径与文献值符合得很好，且探测效率也与国际上同类型装置的先进水平相当，完整地验证了这套基于

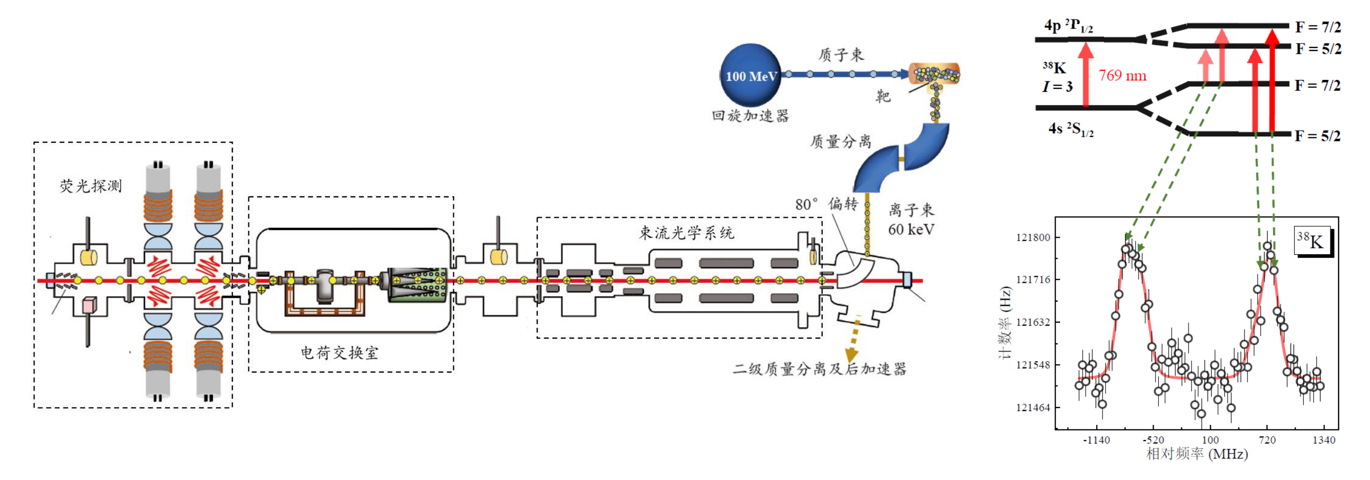


图 4　（在线彩图）基于荧光探测的共线激光谱在线实验终端示意（左）和测得的 ^{38}K 的超精细结构谱（右）[55]

荧光探测的共线激光谱终端的性能。但由于此次实验使用的束流为连续束，且束流的能量离散偏大，对实验测量的灵敏度和分辨率均造成了一定的影响。目前，我们已着手研发射频四极 (RFQ, Radio Frequency Quadrupole) 冷却聚束器。RFQ 冷却聚束器可以将注入的连续束流转变为脉冲束，并通过缓冲气体等减少束流的能量离散，从而极大压制激光散射光子带来的本底噪声，并降低能量离散带来的多普勒展宽，以显著提升激光核谱终端整体的灵敏度及分辨率。

4.2　基于离子探测的共线共振电离谱离线测试

为了进一步提高高分辨激光核谱技术的灵敏度，我们课题组与国内相关团队合作，在已经建成的荧光探测型共线激光谱的基础上，发展基于离子探测的共线共振电离谱仪。近期，共线共振电离谱的建设和离线测试取得了重要进展[21]。

目前已经发展的共线共振电离谱仪如图 5所示。整条束流线采用 CF 真空标准，可实现 10^{-8} mbar 以下的高真空环境。由高功率脉冲激光器产生的 532 nm 脉冲激光轰击离子源内的固体靶，产生频率为 100 Hz 的一价正离子脉冲束。脉冲离子束由离子源引出后被加速至 20 keV，经 90 度电偏转后进入共线共振电离谱仪。共线共振电离谱仪的束流光学及电荷交换室部分的构造与图 4中基本一致。主要区别在于：(1) 共振电离谱测量中更常见的扫谱方法是直接改变共振激光频率而非改变电压，此时电荷交换室内处于零电势；(2) 荧光探测区前后的锥形孔阵列此时起到差分的作用，可以使相互作用区的真空度达到 10^{-9}-10^{-10} mbar 的超高真空环境。超高真空环境可以大大减少原子与杂散气体碰撞电离带来的离子探测本底。在电荷交换室被中性化后处于基态或亚稳态的原子进入相互作用区后，被第一步频率连续可调的脉冲光共振激发，随后被第二步（第三步）激光共振电离。电离后的离子经 40 度电偏转后被导入离子探测区，由 MagneTOF 离子探测器收集。通过获取系统记录探测器收集的离子信号与第一步激光频率的关系，就可以得到待测核外电子的超精细结构谱。

目前，我们已着手开展针对稳定 ^{64,66,68}Zn 核素的共线共振电离谱测试。首次测试实验采用了如图 6右侧所示的两步共振电离模式。第一步波长为 280.1 nm 且波长连续可调的激光束由脉冲蓝宝石 (Ti:Sa) 激光器经三倍频后产生，对应 Zn 原子的 $^3P_2$ 到 $^3D_1$，$^3D_2$ 和 $^3D_3$ 跃迁；第二步波长为 532 nm 激光束由脉冲 Nd:YAG 激光经倍频后产生。两步激光经由 40 度偏转腔后的石英窗进入束流线，与稳定的 Zn 原子束成反共线。此次测试实验初步得到的 ^{64,66,68}Zn 原子的 $^3P_2 \rightarrow {}^3D_{1,2,3}$ 跃迁的共振电离谱结果如图 6所示，进一步的优化测试工作正在进行中。本次测量采用的脉冲 Ti:Sa 激光的线宽约为 2 GHz，因此测得的谱线分辨有限。目前，我们课题组正在发展基于种子放大技术的窄带（~20 MHz）脉冲激光[56]，以期在后续测试实验中实现共线共振电离谱的高分辨测量。

5　总结与未来展望

激光核谱学技术可以通过测量原子、离子或分子的超精细结构谱来核模型独立地提取待测原子核的自旋、磁矩、电四极矩、电荷半径等基本性质。本文简要回顾了超精细结构谱的研究历史，并介绍了激光核谱实验的技术原理以及相应的实验探测技术。在此基础上，本文以缺中子 Pb 区域出现的形状交错、形状共存和形变岛等结构现象为例，阐述了激光核谱技术在不稳定核奇特结构研究中发挥的作用，并介绍了未来采用共线共振电离技术开展缺中子 Au 同位素研究的实验计划。随后，本

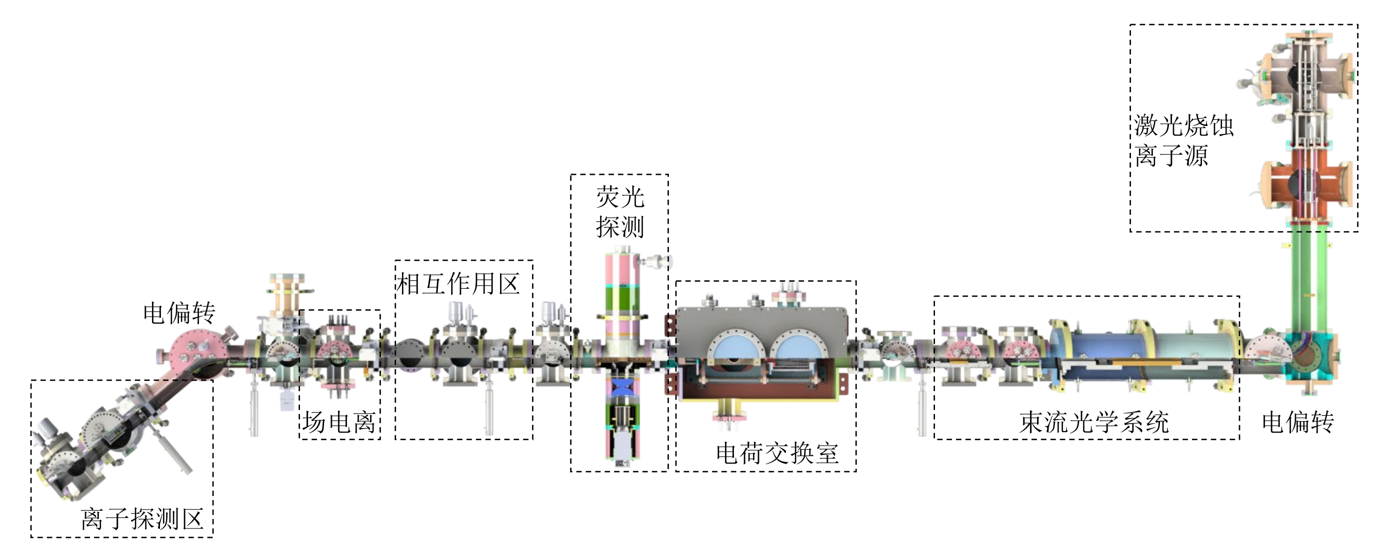


图 5 （在线彩图）基于离子探测的共线共振电离谱离线设备示意图

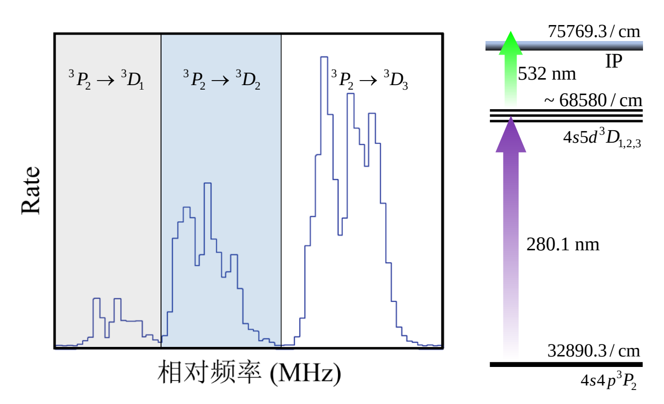


图 6 （在线彩图）^{64,66,68}Zn 稳定核素的共振电离谱测量结果，对应的原子跃迁分别为 $^3P_2$ 到 $^3D_1$，$^3D_2$ 和 $^3D_3$。在每个跃迁中，相对频率从低到高的共振峰分别对应 ^{64,66,68}Zn 的成分。

文介绍了北京大学激光核谱与核性质课题组与国内团队合作在国内放射性核束装置上发展的共线激光谱设备及针对不稳定核的激光核谱在线实验。最后，本文简要介绍了具有高灵敏度优势的共线共振电离谱仪在国内的建设现状，以及正在开展的针对稳定 Zn 同位素的离线测试初步结果。

基于 ISOL 技术的放射性核束装置不仅能够产生放射性离子，也可以实现放射性分子的产生和提取。近期，利用共线共振电离谱技术首次实现了放射性分子 ($^{223-228}$RaF) 的激光核谱测量[57]。低能区电偶极矩的测量可能是寻找用以解释宇宙中正反物质不对称对应的 CP 破缺效应的一个重要途径。理论研究表明，含有八极形变重原子核的放射性分子有望将电偶极矩的测量灵敏度提高 3-7 个量级[58]。因此，放射性分子谱研究被认为是研究 CP 对称性破缺的重点候选体系，相关研究已列入美国、欧洲新一轮核物理长程规划[59]。此外，放射性分子谱也为原子核的电磁多极矩、核结构和核天体等研究提供了新的机遇，并将推动原子及原子核理论的进一步发展[59-60]。

近年来，国内的放射性核束装置迎来了高速发展的时期，未来有望产生更接近滴线区的不稳定核素，实验可以触及的核素版图将持续扩大。北京串列加速器核物理国家实验室的 BRIF 团队正在发展的铀靶技术已经取得重要进展，实现了部分中等质量区不稳定原子核的产生，预计将提供更多中等质量和重质量区的可测量核素。我们将进一步优化升级 BRIF 装置的共线激光谱实验终端，将其拓展为灵敏度更高的共线共振电离谱终端，并与 RFQ 冷却聚束器相结合，以进一步提升激光核谱终端的测量灵敏度和分辨率。这种共线共振电离谱终端有望在 BRIF 装置上应用于更广范围内的不稳定原子核的基本性质和结构研究。位于广东惠州的的强流重离子加速器装置 (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility，HIAF) 预计于近年建设完成[61]。我们正在测试的共线共振电离谱仪也将与 HIAF 的低能核结构谱仪终端结合，开展针对重核和超重核的性质和结构研究，并在此基础上开拓针对放射性分子的谱学研究。

参考文献

[1] TANIHATA I, HAMAGAKI H, HASHIMOTO O, et al. Phys Rev Lett, 1985, 55: 2676. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.55.2676.

[2] CAMPBELL P, MOORE I, PEARSON M. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2016, 86: 127. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641015000915. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2015.09.003.

[3] YANG X, WANG S, WILKINS S, et al. Progress in Particle and Nu-

clear Physics, 2023, 129: 104005. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641022000631. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2022.104005.

[4] YAMAGUCHI T, KOURA H, LITVINOV Y, et al. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2021, 120: 103882. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641021000363. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103882.

[5] DENG H Y, ZHANG Y H, FU C Y, et al. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3): 301-308. (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40
(邓涵宇, 张玉虎, 付超义, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(3): 301.)

[6] PLAß W R, DICKEL T, CZOK U, et al. Nucl Instr and Meth B, 2008, 266(19): 4560. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X08007763. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.05.079.

[7] CHEN J, LOU J L, YE Y L, et al. Phys Rev C, 2018, 98: 014616. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.98.014616.

[8] NEYENS G. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(4): 633. https://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/66/4/205.

[9] JACQUINOT P, KLAPISCH R. Reports on Progress in Physics, 1979, 42(5): 773. https://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/42/5/001.

[10] PAPUGA J, BISSELL M L, KREIM K, et al. Phys Rev Lett, 2013, 110: 172503. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.172503.

[11] MUELLER P, SULAI I A, VILLARI A C C, et al. Phys Rev Lett, 2007, 99: 252501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.252501.

[12] KOSZORÚS Á, YANG X F, JIANG W G, et al. Nature Physics, 2021, 17(4): 439. https://doi.org/10.1038/s41567-020-01136-5.

[13] YANG X F, WRAITH C, XIE L, et al. Phys Rev Lett, 2016, 116: 182502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.182502.

[14] VERNON A R, GARCIA RUIZ R F, MIYAGI T, et al. Nature, 2022, 607(7918): 260. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04818-7.

[15] LAATIAOUI M, LAUTH W, BACKE H, et al. Nature, 2016, 538 (7626): 495. https://doi.org/10.1038/nature19345.

[16] MARSH B A, DAY GOODACRE T, SELS S, et al. Nature Physics, 2018, 14(12): 1163. https://doi.org/10.1038/s41567-018-0292-8.

[17] KOWALSKA M, ASCHENBRENNER P, BARANOWSKI M, et al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2017, 44(8): 084005. https://dx.doi.org/10.1088/1361-6471/aa77d7.

[18] MA Y J, CUI B Q, YAN M F, et al. Nuclear Physics Review, 2015, 32(S1): 1-4. (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.1
(马鹰俊, 崔保群, 晏明芳, 等. 原子核物理评论, 2015, 32(S1): 1.)

[19] WANG S, YANG X, BAI S, et al. Nucl Instr and Meth A, 2022, 1032: 166622. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222001942. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166622.

[20] LIU Y C, YANG X F, BAI S W, et al. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(3): 38. https://doi.org/10.1007/s41365-023-01197-0.

[21] ZHANG P, HU H, YANG X, et al. Nucl Instr and Meth B, 2023, 541: 37. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X23001489. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2023.04.020.

[22] BRIX P. On the shoulders of giants — early history of hyperfine structure spectroscopy. for gisbert zu putlitz[C]//JUNGMANN K P, KOWALSKI J, REINHARD I, et al. Atomic Physics Methods in Modern Research. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997: 439.

[23] CASIMIR H B G. Hyperfine Interactions, 1983, 15(1): 1. https://doi.org/10.1007/BF02159707.

[24] GOUDSMIT S A. Physics Today, 1961, 14(6): 18. https://doi.org/10.1063/1.3057597.

[25] PAULI W. Naturwissenschaften, 1924, 12: 741. https://cir.nii.ac.jp/crid/1572824500446774784.

[26] GOUDSMIT S, BACK E. Zeitschrift für Physik, 1927, 43(5): 321. https://doi.org/10.1007/BF01397446.

[27] SCHÜLER H, SCHMIDT T. Zeitschrift für Physik, 1935, 94(7): 457. https://doi.org/10.1007/BF01330611.

[28] CASIMIR H. Physica, 1940, 7(3): 169. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031891440901033. DOI: https://doi.org/10.1016/S0031-8914(40)90103-3.

[29] FRICKE G, BERNHARDT C, HEILIG K, et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, 60(2): 177. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092640X85710078. DOI: https://doi.org/10.1006/adnd.1995.1007.

[30] ZHANG P, LIU Y S, BAI S W, et al. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(9): 1054. (in Chinese) DOI: https://doi.org/10.1360/TB-2022-1116
(张鹏, 刘寅绅, 白世伟, 等. 科学通报中文版, 2023, 68(9): 1054. http://www.sciengine.com/publisher/ScienceChinaPress/journal/ChineseScienceBulletin/68/9/10.1360/TB-2022-1116.)

[31] BISSELL M L, PAPUGA J, NAÏDJA H, et al. Phys Rev Lett, 2014, 113: 052502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.052502.

[32] NEUGART R. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1981, 186(1): 165. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X81909022. DOI: https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90902-2.

[33] MILLER A J, MINAMISONO K, KLOSE A, et al. Nature Physics, 2019, 15(5): 432. https://doi.org/10.1038/s41567-019-0416-9.

[34] de Groote R, de Roubin A, CAMPBELL P, et al. Nucl Instr and Meth B, 2020, 463: 437. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X19302125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.04.028.

[35] VOSS A, PROCTER T, SHELBAYA O, et al. Nucl Instr and Meth A, 2016, 811: 57. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215015648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.145.

[36] LAGAKI V, HEYLEN H, BELOSEVIC I, et al. Nucl Instr and Meth A, 2021, 1014: 165663. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221006483. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165663.

[37] HU H R, GUO Y F, YANG X F, et al. NUCLEAR TECHNIQUES, 2023, 46(8):155. (in Chinese) DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080017.
(胡晗睿, 郭洋帆, 杨晓菲, 等. 核技术, 2023, 46(8): 155.)

[38] COCOLIOS T E. Hyperfine Interactions, 2017, 238(1): 16. https://doi.org/10.1007/s10751-016-1391-5.

[39] VERNON A, de Groote R, BILLOWES J, et al. Nucl Instr and Meth B, 2020, 463: 384. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X19302356. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.04.049.

[40] DE GROOTE R P, BILLOWES J, BINNERSLEY C L, et al. Phys Rev C, 2017, 96: 041302. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev

C.96.041302.

[41] SÁNCHEZ R, NÖRTERSHÄUSER W, DAX A, et al. Nuclear charge radius of 11li[C]//BŁASZCZAK Z, MARKOV B, MARINOVA K. LASER 2006. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 181.

[42] ŽáKOVá M, ANDJELKOVIC Z, BISSELL M L, et al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2010, 37(5): 055107. https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/37/5/055107.

[43] HEYLEN H, DE RYDT M, NEYENS G, et al. Phys Rev C, 2016, 94: 034312. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.94.034312.

[44] OTSUKA T, GADE A, SORLIN O, et al. Rev Mod Phys, 2020, 92: 015002. https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.92.015002.

[45] BONN J, HUBER G, KLUGE H J, et al. Phys Lett B, 1972, 38(5): 308. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269372902535. DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(72)90253-5.

[46] RUD N, WARD D, ANDREWS H R, et al. Phys Rev Lett, 1973, 31: 1421. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.31.1421.

[47] PROETEL D, DIAMOND R M, KIENLE P, et al. Phys Rev Lett, 1973, 31: 896. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.31.896.

[48] BONN J, HUBER G, KLUGE H J, et al. Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei, 1976, 276(3): 203. https://doi.org/10.1007/BF01412098.

[49] BARZAKH A, ANDREYEV A N, RAISON C, et al. Phys Rev Lett, 2021, 127: 192501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.192501.

[50] DE WITTE H, ANDREYEV A N, BARRÉ N, et al. Phys Rev Lett, 2007, 98: 112502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.112502.

[51] YANG X, BAI S, NEYENS G. High-resolution laser spectroscopy of light gold isotopes: investigation of "island of deformation" and shape coexistence[R/OL]. Geneva: CERN, 2023. https://cds.cern.ch/record/2856473.

[52] ANDREYEV A, BARZAKH A. Part I: β-delayed fission, laser spectroscopy and shape-coexistence studies with astatine beams; Part II: Delineating the island of deformation in the light gold isotopes by means of laser spectroscopy[R/OL]. Geneva: CERN, 2013. https://cds.cern.ch/record/1551259. DOI: 10.17181/CERN.AIUF.7A0H.

[53] WALLMEROTH K, BOLLEN G, DOHN A, et al. Nuclear Physics A, 1989, 493(2): 224. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947489903965. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90396-5.

[54] ANDEL B. Laser assisted studies of β-delayed fission in ^{178,176}Au and of the structure of ^{175}Au[R/OL]. Geneva: CERN, 2020. https://cds.cern.ch/record/2717952.

[55] WANG S. Development of collinear laser spectroscopy and physical measurement based on brif[D]. Peking University, 2023.

[56] REPONEN M, SONNENSCHEIN V, SONODA T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 908: 236. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218310313. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.073.

[57] GARCIA RUIZ R � F, BERGER R, BILLOWES J, et al. Nature, 2020, 581(7809): 396. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2299-4.

[58] Alarcon R, Alexander J, Anastassopoulos V, et al. arXiv e-prints, 2022: arXiv:2203.08103. DOI: 10.48550/arXiv.2203.08103.

[59] Arrowsmith-Kron G, Athanasakis-Kaklamanakis M, Au M, et al. arXiv e-prints, 2023: arXiv:2302.02165. DOI: 10.48550/arXiv.2302.02165.

[60] UDRESCU S M, BRINSON A J, RUIZ R F G, et al. Phys Rev Lett, 2021, 127: 033001. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.033001.

[61] YE Y L, YANG X F, LIU Y, et al. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica Astronomica, 2020, 50(11): 112003. (in Chinese) DOI: https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0282
(叶沿林, 杨晓菲, 刘洋, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2020, 50(11): 112003. http://www.sciengine.com/publisher/ScienceChinaPress/journal/SCIENTIASINICAPhysica,Mechanica&Astronomica/50/11/10.1360/SSPMA-2020-0282.)

Progress and Opportunity of Precision Laser Spectroscopy for the Study of Unstable Nuclei

LIU Yinshen[1], YANG Xiaofei[1], ZHANG Peng[1], HU Hanrui[1], BAI Shiwei[1], WANG Shujing[1], LIU Yongchao[1], GUO Yangfan[1], LIN Zheyang[1], YAN Zhou[1], MEI Wencong[1], CHEN Shaojie[1], NI Xinyue[1], XIE Bingqi[1], YE Yanlin[1], LI Qite[1], LI Hongwei[2], HE Chuangye[2], YANG Jie[3], LIU Zuoye[4]

(*1. School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;*
2. China Institute of Atomic Energy (CIAE), P.O. Box 275(10), Beijing 102413, China;
3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
4. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The basic properties of atomic nuclei including spins, magnetic moments, electric quadrupole moments and charge radii, are sensitive probes to different aspects of exotic nuclear structure, and are also important to investigate the unrevealed nature of interaction between nucleons. Based on multidiscipline, laser spectroscopy is a unique tool to precisely measure the basic nuclear properties mentioned above in a nuclear-model independent way by measuring the hyperfine structure of atoms, ions, or molecules, which has played an important role in the study of exotic nuclear structures across the different regions of the nuclear chart. Basic principles of laser spectroscopy and various types of experimental devices are expounded after the brief history of the hyperfine structure. Furthermore, advantages of utilizing laser spectroscopy in the study of nuclear structure are briefly introduced by taking the radioactive neutron-deficient Pb region as an illustration. In addition, current condition of collinear laser spectroscopy setup has been systematically reviewed, together with the latest progress on collinear resonance ionization spectroscopy offline devices at Peking University. Finally, the developing status and ongoing plan of laser spectroscopy devices for current and future radioactive ion beam facilities in China have been put forward, and the broad prospects of laser spectroscopy in unstable nuclear properties and the fundamental symmetries based on molecular spectroscopy are interpreted.

Key words: hyperfine structure; laser spectroscopy; unstable nuclei; fluorescence detection; ion detection;

Received date: 15 Feb. 2024; **Revised date:** 15 Feb. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 12027809, U1967201 and 11961141003); National Key R&D Program of China (No. 2022YFA1604800, 2023YFE0101600)

Corresponding author: YANG Xiaofei, E-mail: xiaofeiyang@pku.edu.cn